

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Řezání keramiky

Cutting of Ceramic

Student: Přemysl Nesét

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Vladimír Vrba CSc.

Ostrava 2009

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18. 9. 2009

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákony o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 18. 9. 2009

Přemysl Nesét

Nová Hradečná 144

783 84 Nová Hradečná

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

NESÉT, P., Řezání keramiky. Ostrava: katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009, 45 s. Bakalářská práce, vedoucí Vrba, V.

Bakalářská práce se zabývá problematikou obrábění keramiky. V první části je zaměřena na popis problematiky obrábění keramických materiálů a jejich hlavní charakteristické vlastnosti, rozdělení, použití.

Ve druhé části se zabývá diamantovými nástroji, které jsou nejvhodnější k opracování keramických materiálů. Nejdůležitější vlastnosti diamantových nástrojů k návrhu co nejlepší alternativy pro daný materiál. Seznámení se s typy brusných zařízení. Následně provedeny různé experimenty. V závěru práce shrnuta problematika obrábění keramických materiálů.

ANNOTATION OF THESIS

Neset, P., Cutting ceramics. Ostrava: Department of machining and assembly, Faculty of Mechanical Engineering VŠB-Technical University of Ostrava, 2009, 45 p. Thesis, head: Vrba, V.

This Bachelor thesis deals with machining of ceramics. The first part focuses on descriptions machining of ceramic materials and their main characteristics, distribution, use.

The second part deals with diamond tools that are best suited for working ceramics. The most important properties of diamond tools to design the best alternative to the material. Getting to know the types of grinding equipment. Subsequently, various experimenty. At conclusion of the thesis summarizes the problem of machining ceramic materials

OBSAH

1 ÚVOD.....	7
2 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA PROBLÉMU.....	8
2.1 KERAMICKÉ MATERIÁLY.....	8
2.2 OBRÁBĚNÍ KERAMICKÝCH POVRCHŮ.....	8
2.3 OBRÁBĚNÍ DIAMANTOVÝMI NÁSTROJI.....	9
2.3.1 ŘEZNÉ PODMÍNKY.....	10
2.4 TYPY KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ.....	11
2.4.1 OBLASTI APLIKACE.....	12
3 PROBLEMATIKA OBRÁBĚNÍ KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ.....	14
3.1 BROUŠENÍ.....	14
3.1.1 OBLAST PRIMÁRNÍ PLASTICKÉ DEFORMACE.....	16
3.1.2 OBLAST SEKUNDÁRNÍ PLASTICKÉ DEFORMACE.....	16
3.1.3 OBLAST STYKU HŘBETU ZRNA A BROUŠENÉHO POVRCHU.....	16
3.1.4 VLASTNOSTI NOVÉHO POVRCHU.....	17
3.1.5 VLIVY PŮSOBÍCÍ PŘI BROUŠENÍ.....	17
3.1.6 OBRÁBĚCÍ PODMÍNKY.....	18
3.1.7 BROUŠENÝ MATERIÁL.....	19
3.1.8 PROSTŘEDÍ PROBÍHAJÍCÍHO PROCESU.....	19
4 NÁVRH DIA KOTOUČE PRO KONKRÉTNÍ PODMÍNKY BROUŠENÍ.....	20
4.1 CHARAKTERISTIKA DIA KOTOUČŮ.....	20
4.1.1 DRUH BRUSIVA.....	20
4.1.2 TVAR KOTOUČE.....	24
4.1.3 ROZMĚR KOTOUČE.....	25
4.1.4 DRUH POJIVA.....	26
4.1.5 ZRNITOST BRUSIVA.....	28
4.1.6 KONCENTRACE BRUSIVA.....	29
4.2 NÁVRH DIA KOTOUČE.....	30
5 DISKUZE EXPERIMENTU.....	31
5.1 BROUSICÍ STROJE.....	31
5.2 INTEGRITA POVRCHU-KLÍČOVÝ FAKTOR SOUČASNOSTI.....	32
5.3 ZAŘÍZENÍ PRO BROUŠENÍ KERAMIKY.....	32
5.4 HODNOTY NASTAVENÍ CNC.....	36
5.5 EXPERIMENT.....	37
6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	42
7 ZÁVĚR.....	42
8 SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ.....	43
9 PŘÍLOHY.....	44

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

CAM	[-]	počítačem podporovaná výroba
CNC, NC	[-]	řízení obráběcího stroje počítačem, resp. programem
v_c	$[m.s^{-1}]$	řezná rychlost
v_f	$[mm.min^{-1}]$	přísuv
v_w	$[m.min^{-1}]$	podélný posuv
HV	[-]	tvrdost dle Vickerse
Ra	[-]	drsnost povrchu
P	[MPa]	tlak
G	[-]	poměr úběru brusné vrstvy a obrobené vrstvy
F_n	[N]	síla normálová
Q_w	$[mm^3/s.mm]$	úběr materiálu
n	$[ot.min^{-1}]$	otáčky hřídele

1 ÚVOD

V této práci se budu zabývat problematikou obrábění keramických materiálů diamantovými nástroji. Pokusím se popsat vlastnosti **keramických materiálů** a také vlastnosti řezacích respektive brousicích **diamantových nástrojů**.

Firma **Urdiamant** oslavila v tomto roce 75-té výročí založení, tzn. v roce 1934. Zakladatelem byl pan Urbánek → z toho plyne název Urdiamant, který se zabýval výrobou diamantových orovnávačů a diamantových průvlaků pro tažení drátů. V 50-tých letech v rámci znárodnění vzal firmu pod svá křídla národní podnik PRAMET zabývající se výrobou slinutého karbidu a nástrojů z něj. Urdiamant byl zařazen do podniku jako divize 6 – diamantové nástroje, ovšem obchodní značka URDIAMANT zůstala zachována.

V 60-tých letech, kdy byla v Prametu započata výroba syntetického diamantu a později i kubického nitridu boru – KBN se sortiment nástrojů Urdiamant začal rozšiřovat o brousicí kotouče – hlavně pro broušení SK, skla, oceli, keramiky....., řezací a brousicí kotouče pro stavebnictví a v neposlední řadě o vrtací nástroje – korunky a dláta pro stavebnictví, geologický průzkum atd., a průvlaků z polykrystalů.

Počátkem 90-tých let přešel Pramet v rámci privatizace do soukromých rukou a některé jeho divize se začaly osamostatňovat. Mezi nimi byla i divize 6, a tak byla obnovena firma Urdiamant. V současné době má firma cca 80 zaměstnanců včetně obchodního zastoupení na Slovensku a v Polsku. V roce 1999 získala firma certifikát kvality ISO 9000 což jí v jisté míře otevřelo dveře na zahraniční trh. V současnosti exportuje své výrobky asi do 20-ti zemí hlavně v Evropě, ale i Asii a Americe.

2 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA PROBLÉMU

2.1 KERAMICKÉ MATERIÁLY

Jedním z nejvíce fascinujících materiálů dnešní doby jsou: vysoce výkonnostní keramické materiály. Po celém světě nepřetržitě po 24 hodin denně jsou vysoce výkonnostní keramické materiály používány jako součásti strojů, systémů nebo v lidském těle. Jejich speciální mechanické, elektrické, tepelné a biochemické vlastnosti jsou často neviditelné pro uživatele, ale často hrají důležitou či dokonce rozhodující úlohu. S ohledem na svoje specifické vlastnosti jsou vysoce výkonnostní keramické materiály používány v širokém spektru fascinujících aplikací a můžou sloužit tam, kde jiné materiály selhávají.

2.2 OBRÁBĚNÍ KERAMICKÝCH POVRCHŮ

Praktické využití vysocepevných a všestranně odolných keramických materiálů je podmíněno potřebou efektivních technologií obrábění funkčních povrchů. Jedná se o dokončovací technologie, které při specifických vlastnostech keramiky zajistí vysokou přesnost rozměru a tvaru i jakost dokončeného tvaru i jakost dokončeného povrchu. Pro svou vysokou tvrdost a malou houževnatost jsou keramické materiály špatně obrobitelné a lze je prakticky dokončovat jen broušením, lapováním, případně některými nekonvenčními metodami obrábění.

Proces úběru keramického materiálu brousicím kotoučem (styk kotouče s keramikou) není dosud zcela objasněn. Model utváření třísek vychází z předpokladu, že působením vysoké teploty se v místě řezu snižuje tvrdost keramiky, která se plasticky deformuje a může být obráběna jako ostatní materiály. Další model označuje za rozhodující působení tlakových sil v místě styku kotouče s keramikou. V reálném procesu broušení se pravděpodobně uplatní kombinace obou modelů v závislosti na typu keramiky a podmínkách broušení. Velmi výrazně se projeví charakteristické defekty keramického materiálu, tj. trhliny, póry a necelistvosti. Jejich počet a velikost, spolu s napětovým polem vyvolaným zrnem brusiva působícím na povrch keramiky, jsou rozhodující pro způsob oddělování třísek.

Při broušení je keramický materiál ve směru pohybu zrna zatěžován velkými silami a teplotami. Keramický materiál je brousicím zrnem stlačován a může být plasticky deformován. Za brusným zrnem se materiál odlehčí a působením tahového namáhání se

objevují trhlinky a vydroleniny. Vysokým namáháním dna rýhy po brusném zrně tak vznikají trhliny rovnoběžné se směrem broušení. Jsou relativně hluboké a způsobují největší redukci pevnosti keramiky. Kolmo ke směru broušení se objevují radiální trhliny, které nejsou tak hluboké jako podélné trhliny, a proto je i jejich vliv na pevnost keramiky menší. Koncentrované napětí v koncích trhlín keramického materiálu může způsobit kritické šíření trhlín a poškození materiálu. Šíření trhlín však mohou omezit tlaková zbytková pnutí.

2.3 OBRÁBĚNÍ DIAMANTOVÝMI NÁSTROJI

I když jsou keramické materiály vesměs označovány za tvrdé a křehké, jsou poměry mezi kovalentní a iontovou vazbou u jednotlivých druhů rozdílné (mění se od 4:6 u oxidické keramiky – kupř. Al_2O_3 , do 9:1 u neoxidické keramiky). Pevnost a lomová houževnatost materiálů s velkým podílem iontové vazby jsou (na rozdíl od materiálů s kovalentní vazbou) výrazně ovlivňovány teplotou. Proto může při vysoké teplotě u materiálů s převážně iontovou vazbou vznikat při broušení plastická deformace.

Je zřejmé, že hodnocení procesu řezání keramiky je mimořádně obtížné a proto se vesměs soustřeďuje na využití výsledků procesu broušení, tzn. údajů získaných měřeními dokončeného povrchu (mikronerovností, zbytkových pnutí, apod.). tvaru třísek oddělovaných brousicím kotoučem aj.

Na základě studia mechanismu oddělování třísek při broušení byly stanoveny obecné zásady procesu broušení keramiky. Pro hrubovací broušení je doporučován úběr větší plochy třísek tak, aby se uplatnil mikrokřehký lom. Podmínkami dokončovacího broušení bude vhodné zajistit působení plastické deformace vedoucí k vyšší jakosti broušeného povrchu. Toho lze docílit kupř. úběrem třísek o malé ploše.

Praxe potvrzuje, že z hlediska technického i ekonomického je nejvhodnějším brousicím materiálem na keramiku diamantový kotouč (DIA). Pro určité typy keramických materiálů lze za jistých podmínek využít pro broušení karbid křemíku, nebo kubický nitrid bóru. V každém případě je průvodním jevem procesu broušení keramiky intenzivní opotřebení brousicích kotoučů. Opotřebení kotouče způsobuje změnu jeho řezivosti a geometrie s přímým vlivem na jakost i přesnost obrobené plochy. Vyšší opotřebení brousicích kotoučů výrazně ovlivní operační náklady na broušení. V současné době náklady na nástroj představují velký podíl z ceny broušení.

Základním předpokladem účinného broušení kotouči DIA je udržet je v ostrém stavu. Vzhledem k vysoké tvrdosti brusných zrn je splnění tohoto požadavku obtížné, a to i v případě správného výběru kotouče zajišťujícího přiměřenou výměnu řezných zrn. Orovnávání, příp. obtahování, oživování kotouče vyžaduje delší dobu a účinnější způsob provedení, než je obvyklé u klasických typů. Výhodným se ukazuje využití orovnávacích kotoučů. Místo styku rotujících kotoučů je intenzivně chlazeno kapalinou. Z hlediska udržení válcového tvaru broušícího kotouče je důležité, aby při podélném vzájemném posuvu zůstaly kotouče neustále v kontaktu a nedocházelo ke srážení hran kotouče. Orovnaný kotouč má být očištěn měkkým obtahovacím kotoučem Al_2O_3 .

2.3.1 ŘEZNÉ PODMÍNKY

Řezné podmínky významně spolurozhodují o výkonu broušení i o dosažené kvalitě broušeného povrchu. Pro rovinné broušení kotouči DIA lze za obecně vhodné řezné podmínky považovat řeznou rychlost $v_c = 30\text{--}35 \text{ m/s}$, přísuv $v_f = 0,005\text{--}0,025 \text{ mm/min}$ a podélný posuv $v_w = 10\text{--}15 \text{ m/min}$. Různé druhy keramiky vykazují velké rozdíly v obrusitelnosti. Výslednou kvalitu dokončeného povrchu ovlivňuje typ operace broušení, druh broušícího kotouče a stav brusky. Proto se doporučuje před zahájením produkčního broušení provést orientační zkoušky v konkrétních podmínkách provozu. Výsledná kvalita povrchu keramiky je ovlivněna jednak procesem oddělování třísek při řezání, jednak póry a defekty charakteristickými pro tento materiál. Uvedené poruchy (především keramických nástřiků) nelze odstranit ani optimálním procesem broušení. V každém případě je třeba s nimi počítat při posuzování funkčních vlastností povrchu. Pórovitost keramických materiálů do jisté míry usnadňuje proces odebrání třísek, ale současně vytváří technologickou bariéru pro zlepšování drsnosti povrchu broušením. Zejména početnější výskyt větších pórů při dotykovém měření broušeného povrchu přímo ovlivňuje hodnoty drsnosti. Eliminovat podíl pórů od vlastní drsnosti se zatím nepodařilo. Proto je třeba tuto skutečnost uplatnit při přiřazování drsnosti k funkčním požadavkům.

2.4 TYPY KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

Společnost CeramTec Czech Republic se specializuje na výrobu produktů ze sintrovaných (SSiC) a infiltrovaných (SiSiC) karbidů křemíku.

Výrobky:

- Těsnicí kroužky
- Trysky
- Hořáky
- Kluzná ložiska
- Třídící a mlecí kola
- Armatury
- Kulové ventily
- Vložky
- Díly čerpadel
- Vřetena
- Lopatková kola
- Speciální aplikace

Díky vynikajícím kluzným vlastnostem, vysoké tvrdosti, oděruvzdornosti, chemické odolnosti, jsou SiSiC a SSiC materiály vynikajícím řešením pro kluzné kroužky v mechanických ucpávkách. Životností násobně překonávají materiály na bázi grafitu a výborně odolávají působení chemických médií. Díky jedinečné technologii je možné dodávat kluzné kroužky až do průměru 1000 mm z jednoho kusu.

- infiltrovaný karbid křemíku – hrubozrnný SiSiC, jemnozrnný
- slinovaný karbid křemíku – SSiC

Oba materiály vynikají vysokou teplotní odolností, velmi nízkým koeficientem teplotní roztažnosti, velmi vysokou tvrdostí, otěruvzdorností, vysokou korozní odolností, nízkou měrnou hustotou, nepropustností pro plyny a kapaliny, výbornou tepelnou vodivostí, výbornými kluznými vlastnostmi a mezi keramickými materiály vysokou odolností vůči teplotním šokům.

2.4.1 OBLASTI APLIKACE

SiSiC

SiSiC je klasickým materiálem s širokým spektrem uplatnění v aplikacích, kde nejsou vhodné levnější vyspělé materiály (kompozity, grafit, Al_2O_3 - korund apod.). Chemická odolnost je omezena do $\text{pH} = 10$. Drsnost neobrobeného materiálu je pod 6,3.

SSiC

SSiC materiál má vyšší užitnou hodnotu, díky vyšší teplotní a chemické odolnosti (v celém rozsahu pH – dle chemické odolnosti). Výrobní náklady jsou vyšší než u SiSiC, proto nalezne uplatnění v nejnáročnějších aplikacích materiálů z karbidu křemíku. Drsnost neobrobeného materiálu je R_a 0,8 až 1,6.

Tab. 1/2 Přehled charakteristických vlastností keramických materiálů

Všeobecné vlastnosti	Jednotky	SSiC	SiSiC
Hustota	g/cm ³	3,15	3,07
Absorpční schopnost	%	0	0
Plynová propustnost	%	0	0
Mechanické vlastnosti			
Pevnost v ohybu 20°C 1000°C	MPa	410 -	340 340
Pevnost v tlaku	MPa	3500	> 3500
E-modul	GPa	430	340
Tvrdost	HV 10 HV 0,2	2300	1200(Si) 2700(SiC)
Pevnost v lomu K _{IC}	MPa m 1/2	4,4	4,0
Weibull modul		> 10	> 14
Poissonova konstanta		0,17	0,17
Hrubost R_a	μm	< 0,04	< 0,02

Tepelné vlastnosti	Jednotky	SSiC	SiSiC
Tepelná vodivost 20 - 100°C	W/mK	115	120
Koeficient tepelné roztažnosti 20 - 100°C 20 - 400°C 20 - 600°C 20 - 1000°C	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	2,8 3,6 4,1 4,6	3,4 4,1 4,4 4,9
Tepelná kapacita cp 20 - 100°C cp 1000°C	J/gK	0,6 -	0,7 1,3
Dielektrická pevnost	KV/mm	-	-
Dielektrická konstanta (10 MHz)	eps	53,5 - 57,8	59 - 455
Součinitel dielektrických ztrát (10 MHz)		-	-
Max. použitelná teplota Oxidující, redukující, neutrální Bez nabíjení na vzduchuV inertní atmosféře	°C	- 1500 1800	- 1350 -
Odolnost vůči kolísání teploty	°C	350	1100

Tab. 2/2 Přehled charakteristických vlastností keramických materiálů

Rozdíl v chování SiSiC a SSiC:

Hlavním kritériem je hodnota pH: Od hodnoty pH cca 10 už není SiSiC odolný vůči korozi, alkalická média napadají křemík.

3 PROBLEMATIKA OBRÁBĚNÍ KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ

Jednou z klíčových technologií z hlediska vlastností povrchu součástí představuje technologie broušení. Zvyšují se požadavky na integritu povrchu strojních součástí. Integritu povrchu je možné chápat jako souhrn charakteristik hodnotících vlastností povrchu. Povrch není pouze povrchová plocha ale i povrchová vrstva pod touto plochou. Při všech technologiích obrábění dochází k ovlivnění povrchové vrstvy. To znamená, že funkční vlastnosti povrchu budou jiné, než vlastnosti obráběného materiálu. Odběr třísky, vznik nového povrchu při broušení.

3.1 BROUŠENÍ

Brousící kotouč – deformace x teplo

Vytvářený povrch :

- Geometrická přesnost
- Drsnost povrchu a profil
- Zbytkové napětí
- Změny tvrdosti povrchové vrstvy
- Změny struktury
- Chemické změny
- Tepelné změny (opaly)
- Trhliny

Působením zrn brousícího kotouče upevněných v celek pomocí pojiva dochází k úběru materiálu v podobě třísky. Vlastnímu úběru třísky předchází elastická a plastická deformace materiálu, po překročení meze pevnosti ve smyku a následně potom k tvorbě vlastní třísky. Tento jev je doprovázen dále třením zrna o broušený povrch, vytvářením rýh (plastickou deformací) bez tvorby třísky.

Vzhledem k tvaru zrna probíhá mimo úběr ve tvaru třísky také pouze k plastické deformaci některými zrny a k hrnutí materiálu do boku. Uvedenými jevy je proces broušení charakterizován jako proces, kdy za vzniku deformace a tepla je vytvářen nový povrch. Tento povrch je charakterizován svými vlastnostmi počínaje geometrickou přesností a konče vznikem trhlín.

Broušení probíhá v reálném systému, který ovlivňuje řada působících parametrů procesu. Tyto parametry jsem si dovolil rozdělit podle doby působení a analyzovat ve vztahu k vlastnímu procesu broušení. Jedná se o preprocesní, procesní, postprocesní a analytické veleičiny.

Vznik třísky při broušení

Broušení je významnou technologií, která drží krok s vývojem dalších metod obrábění. Pro broušení platí v principu stejné zákonitosti teorie obrábění jako pro klasické technologie, tvorba třísky je provázána plastickou deformací v primární i sekundární oblasti. Brousicí zrna u klasických brousicích kotoučů mají však nevhodnou geometrii z hlediska vzniku třísky vývinu tepla, zásahu deformací a tepla pod úroveň budoucího povrchu i z hlediska dalších aspektů. Geometrie břitu je při broušení výrazně odlišná od nástrojů s definovanou geometrií břitu.

Broušení tedy probíhá při záběru vysokého množství zrn s nepravidelnou geometrií a některými rozdíly geometrie v porovnání s jedno nebo několikabřitými nástroji. Dochází k neustálému opotřebení zrn, jejich odlamování, lomu a uvolňování z vazby brousicího kotouče. Vzhledem k vysoké rychlosti řezání jsou tyto změny vysoce dynamické v porovnání s opotřebením např. soustružnického nože, frézy atd.

Při broušení probíhá elastická a následně plastická deformace malého množství materiálu při záběru jednotlivého zrna, po překročení pevnosti v rovině smyku dochází k vytvoření třísky.

Tento mechanismus charakterizuje tvorbu třísky v oblasti běžných rychlostí broušení. Při broušení vysokou rychlostí $v_c > 150$ m/s je předpoklad tvorby třísky bez znatelné plastické deformace a při vyšších rychlostech nestačí materiál reagovat na záběr zrna a dochází k usmýknutí částic materiálu ve tvaru velmi drobných třísek, případně je předpokladem tečení materiálu. To dokumentují třísky kulovitěho charakteru, které jsou při těchto rychlostech pozorovány.

3.1.1 OBLAST PRIMÁRNÍ PLASTICKÉ DEFORMACE

První oblastí, jejíž význam si při vytváření nového povrchu a tím i vlastností tohoto povrchu musíme uvědomit, je oblast primární plastické deformace.

Velikost oblasti primární plastické deformace závisí především na geometrii zrna, řezných podmínkách, prostředí a vlastnostech broušeného materiálu.

Uvedené parametry určují hloubku konečného povrchu, který je ovlivněn primární plastickou deformací. Vlastnosti broušeného povrchu jsou také dány objemem tepla, které vzniká při tvorbě třísky.

3.1.2 OBLAST SEKUNDÁRNÍ PLASTICKÉ DEFORMACE

Vliv na integritu povrchové vrstvy má oblast sekundární plastické deformace. Sekundární plastická deformace probíhá mezi čelem zrna a odcházející třískou. Místo styku je charakterizováno vysokým tlakem a teplotou. Částice třísky mohou být navařeny na zrno a zhoršovat jeho řezací schopnost včetně zhoršení kvality konečného povrchu. Takto může dojít i k zanášení brousicího kotouče. Vznik nárůstku charakterizuje při broušení tzv. zalepování brousicího kotouče. Při tomto jevu jsou vyplňovány mezery mezi zrny a nárůstek se velmi obtížně uvolňuje, větší pravděpodobnost je vyplnění mezer mezi zrny a ztráta řezivosti kotouče. Příkladem může být např. broušení za nevhodných podmínek nebo nevhodným zrnem (monokrystalický korund). V uvedeném případě je nutno volit materiál zrna, případně pojiva s nižší vazbou k obráběnému materiálu, případně změnit řezné podmínky. I při broušení dochází k uvolňování nalepených částic třísky a znehodnocování broušeného povrchu.

3.1.3 OBLAST STYKU HŘBETU ZRNA A BROUŠENÉHO POVRCHU

Oblast styku hřbetu zrna a broušeného povrchu ovlivňuje hlavně tvar a morfologie hřbetu, radius ostří a úhel hřbetu. Hřbet zrna vyvolává deformaci broušeného povrchu, probíhá tření hřbetu a broušené plochy za vzniku tepla a jeho působení na povrch. Tato oblast ovlivňuje také mikropofil povrchu působením jednotlivých zrn.

3.1.4 VLASTNOSTI NOVÉHO POVRCHU

Průchodem skupiny brousicích zrn, která jsou pojivem vázána v brousicím kotouči, dochází k odebrání požadované vrstvy materiálu obrobku a tím k vytvoření nového povrchu. Tento povrch může mít požadované vlastnosti vytvořené finální operací nebo vlastnosti ovlivněné předcházející operací. Ve druhém případě jsou vlastnosti povrchu dány superpozicí nejen zbytkových napětí, vzhledem k tomu, že při poslední fázi broušení se odebírá kolem 0,1 – 0,2 mm materiálu povrchu a teplem a feformací ovlivněná hloubka při hrubovací fázi broušení může dosáhnout 0,2 – 0,6 mm. Do této oblasti se dostáváme zejména při výkonných metodách broušení – velký úběr a vysoké rychlosti.

Vlastnosti povrchové vrstvy broušené plochy jsou odvozeny od vlivů všech parametrů řezného procesu počínaje systémem stroje a konče řeznými podmínkami, prostředím a vlastním nástrojem. Vlastnosti povrchové vrstvy tvoří komplexní soubor charakteristik povrchu, které jsou nazývány **integrita povrchvé vrstvy**. Uvedený soubor vlastností předurčuje užitnou hodnotu součástí, zejména dobu životnosti a velikost únosnosti funkčních částí povrchu. Integritu povrchu tvoří geometrická přesnost, drsnost povrchu, zbytková napětí v povrchové vrstvě, změny tvrdosti v povrchové vrstvě, změny struktury v povrchové vrstvě, tepelné změny – opaly a trhliny a chemické změny.

Nemůžeme říci, že jednotlivé složky tvoří oddělené části integrity povrchu. Složky se vzájemně ovlivňují a doplňují. Například vlnitost povrchu jako geometrická veličina může vyvolat změny drsnosti povrchu, změny tvrdosti v povrchové vrstvě mohou souviset se změnami struktury a tepelnými změnami atd.

3.1.5 VLVY PŮSOBÍCÍ PŘI BROUŠENÍ NA VYTVÁŘENÍ NOVÉHO POVRCHU

Při tvorbě nového povrchu broušením působí úplný soubor preprocesních a procesních veličin. Vzhledem ke složitosti procesu je nutno se zabývat změnami jednotlivých veličin odděleně a současně studovat vliv takové změny na zbývající působící veličiny. Například při změně drsnosti povrchu, současně při vlastním procesu dojde ke změně velikosti složek řezné síly, velikosti třísky atd.

Brousicí kotouč

Brousicí kotouč jako nástroj patří k nejdůležitějším prvkům, které ovlivňují průběh i výsledek procesu. Z hlediska brousicího kotouče je rozhodující:

- Zrno – druh, velikost

- Pojivo
- Pórovitost
- Způsob orovnění

Pro tvorbu povrchu je důležitá geometrie zrna, jeho tvrdost, případně trvanlivost břitů, morfologie povrchu, reakce na otupení a přetížení a jeho velikost.

Materiál zrna ovlivňuje významně vlastnosti povrchu nejen svými geometrickými parametry, ale také fyzikálními a chemickými – tepelná vodivost, schopnost vazby k pojivu, teplota difúze atd. Při komplexním výzkumu vlastností povrchu byla získána řada poznatků o vlivu zrna na průběh zbytkových napětí a průběh mikrotvrdosti v povrchové vrstvě. Průběhy vycházejí z teorie, jestliže má zrno vyšší tepelnou vodivost a vyšší vodivost prokazuje také pojivo, dále zrno má trvanlivější rádius ostří, potom vzniká nízké tahové napětí na povrchu a může vzniknout i při broušení na povrchu tlakové zbytkové napětí.

3.1.6 OBRÁBĚCÍ PODMÍNKY

V oblasti řezných podmínek má převážný vliv na integritu povrchu řezná rychlost kotouče, obvodová rychlost obrobku, radiální posunová rychlost a axiální posunová rychlost, dále velikostní faktor daný délkou styku broušícího nástroje a obrobku. Všechny uvedené parametry ovlivňují rozsah oblasti primární i sekundární plastické deformace a také tření zrna o broušenou plochu a tím množství vznikajícího tepla a rozsah tepelného zatížení povrchu. Vliv rychlosti broušícího kotouče na drsnost povrchu v parametru R_a pro jednotlivé typy zrna a současně vliv zatížení daný velikostí radiální posuvové rychlosti v_p . Růst rychlosti má vždy pozitivní vliv na drsnost povrchu, negativně však působí nárůst tepla vznikajícího v oblasti styku zrna a nového povrchu. Toto vyvolává změny tvrdosti, ovlivňuje zbytková napětí apod. Změny řezných podmínek se projevují na integritě broušené plochy ve všech jejích složkách, ať se jedná o mikrotvrdost, zbytková napětí, strukturu atd.

3.1.7 BROUŠENÝ MATERIÁL

Další složkou, která ovlivňuje vlastnosti povrchu po broušení je samotný materiál obrobku a samozřejmě prostředí v němž broušení probíhá. Z hlediska materiálu jsou do procesu vkládány informace o předchozím zpracování materiálu, o jeho vstupní struktuře a chemickém složení povrchu.

3.1.8 PROSTŘEDÍ PROBÍHAJÍCÍHO PROCESU

Posledním důležitým parametrem tvorby povrchu je prostředí vlastního procesu. Toto prostředí při broušení vytváří nejčastěji procesní kapaliny ve formě emulze, polysyntetických nebo syntetických kapalin. Funkcí kapalin je několik:

- odvod tepla z místa plastické deformace a vzniku třísky,
- snížení množství vznikajícího tepla snížením tření mezi brousicím zrnem a povrchem broušené plochy,
- odvod třísky a zamezení ucpávání pórů brousicích kotoučů,
- podpora tvorby třísky,
- zamezení korozi.

Při broušení vzniká tříska malého průřezu (microm), nástroj má nízkou tepelnou vodivost a většina tepla tedy má snahu přecházet do obrobku. Procesní kapalinou snižujeme zejména tření mezi nástrojem a broušenou plochou a tím ovlivňujeme množství vznikajícího tepla. Ke snížení tření postačí menší množství procesní kapaliny, existuje limitní hranice, kdy snížení množství kapaliny již výrazně ovlivňuje jakost povrchu. Tato hranice závisí pro dané řezné podmínky a danou kapalinu na materiálu obrobku a brousicím nástroji, zvláště druhu zrna a použitém pojivu. Řešením oblasti broušení bez chlazení je nízká hutnost kotouče – vysoká pórovitost (prakticky až 16, teoreticky až 22), kdy vysoká pórovitost snižuje tepelné zatížení povrchu a ostrost zrna snižuje množství tepla vznikajícího třením.

4 NÁVRH DIA KOTOUČE PRO KONKRÉTNÍ PODMÍNKY BROUŠENÍ

4.1 CHARAKTERISTIKA DIA KOTOUČŮ

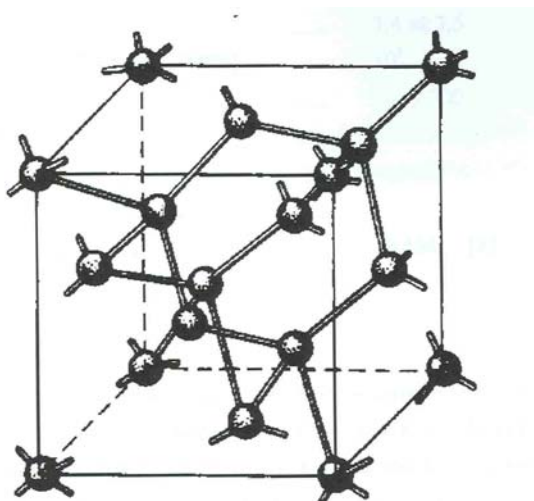
Brousicí kotouč s diamantovým brusivem je charakterizován těmito základními znaky:

- druh brusiva
- tvar kotouče
- rozměr kotouče
- druh pojiva
- zrnitost brusiva
- koncentrace brusiva

4.1.1 DRUH BRUSIVA

Diamant – řadíme mezi supertvrdé materiály, který je lidem znám už tisíciletí. V technické praxi známe dva druhy diamantu – přírodní a syntetický.

Diamant jako jedna z modifikací čistého uhlíku krystalizuje v kubické soustavě. Strukturu uspořádání uhlíkových atomů v elementární mřížce diamantu, tvoří dvě plošně centrované kubické mřížky, které jsou vůči sobě navzájem posunuté ve směru úhlopříčky tělesa o $\frac{1}{4}$ její délky. Když si odmyslíme atomy, které leží mimo jednu z plošně centrovaných krychlí, dostaneme podobu elementární buňky diamantu, která je znázorněna na obr. č. 1.



Obr. č.1 Elementární buňka diamantu

Od šedesátých let je na trhu i syntetický diamant, který se v průmyslu hojně využívá, neboť důsledkem krystalického tvaru se pro něj našly celkem specifické oblasti využití. O přírodních diamantech se vědělo jen to, že vznikly za velkých tlaků a extrémních teplot. To samé platí i pro syntetické diamanty. Diamant je v současné době nejtvrdším materiálem.

Příčinou mimořádné tvrdosti diamantu (v Mohsově stupnici tvrdosti na 10. - posledním místě) je skutečnost, že každý atom se váže se svými čtyřmi dvojicemi valenčních elektronů. Oproti korundu, který je v Mohsově stupnici na 9. místě je 140 - krát tvrdší.

Další fyzikální vlastností diamantu je jeho značná křehkost a velmi malá odolnost vůči nárazům. I velmi malé nárazy mohou způsobit narušení diamantového krystalu.

K fyzikálním vlastnostem diamantu patří i jeho dobrá tepelná vodivost a tepelná odolnost do 700 °C. Při teplotě vyšší než 700°C je diamant schopen se v zásaditém prostředí pomalu rozpouštět, při 900 °C malé diamanty grafitizují. Za normálních teplot je odolný vůči všem chemickým vlivům. Z důvodu chemické afinity uhlíku k železu za vysokých teplot není vhodný pro opracování oceli. Při broušení totiž dochází na styčných plochách diamantového zrna a oceli k velkému vývinu tepla a tím k chemické reakci. To má vliv na změnu struktury jak diamantu, tak povrchu obrobku .

Některé fyzikálně - chemické vlastnosti diamantu :

Krystalická mřížka	kubická plošně centrovaná
Délka strany mřížky	0,3567 nm

Min. vzdálenost mezi sousedními atomy	0,154 nm
Hustota	3,49-3,54 g.cm ⁻³
Mikrotvrdost	8600-10000 H _{VM}
Youngův modul pružnosti	10 ⁵ MPa
Bod tavení	~ 3700 °C
Tepelná stálost	700 – 800 °C
Pevnost v tlaku	8800 MPa

Přírodní diamant

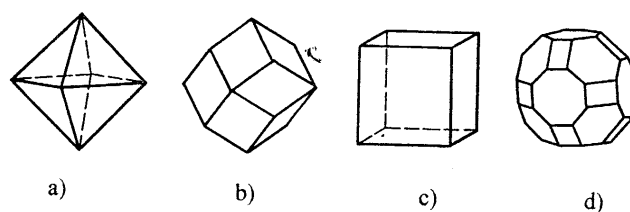
Diamant je po chemické stránce čistý uhlík, který v přírodě krystalizuje během dlouhého časového období v podmínkách vysokých tlaků a teplot. Tyto podmínky existovaly jen v sopkách, proto se také dnešní naleziště vyskytují v kráterech vyhaslých sopek – prvotní naleziště. Další naleziště diamantů – druhotná, jsou v usazeninách písku a bahna v dolních tocích a ústích řek, které vznikly přirozeným vymýváním vulkanického bahna. Diamanty se dnes těží v Africe (Kongo, Siera Leone...), jižní Americe (Brazílie), Asii (Rusko, Čína, Indie) ...

Podle nejvšeobecnějšího třídění rozlišujeme dva typy přírodního diamantu: šperkařské a průmyslové.

Pro šperkařské účely (asi 20%) se vybírají diamanty různé velikosti (od 0,004g do 0,04g a více), čisté nebo se slabým žlutým, růžovým, modrým, zeleným i hnědým odstínem.

Průmyslové diamanty jsou horší kvality, co se týče zabarvení, vnitřních vad apod. Nehodí se pro šperkařský průmysl. Rozdělují se obvykle do čtyřech skupin:

- 1.) **Borty** – v průmyslu se používá pro výrobu různých nástrojů jako průvlaky na tažení drátu, obráběcí nože, jednoramenné orovnávače, vrtací korunky, řezací a brousící kotouče pro stavebnictví. Mají tvar pravidelných mnohostěnů.
- 2.) **Krašínky** – tvoří krystaly nepravidelných tvarů, používají se hlavně pro výrobu diamantové drtě, která se používá k broušení a leštění.
- 3.) **Ballasy** – drobné krystalky kulatého tvaru vyznačující se velkou tvrdostí a pevností, vhodné pro hlubinné vrtání
- 4.) **Karbonado** – černé diamanty, jsou to velmi tvrdé technické diamanty, které se vyskytují velmi zřídka – pouze v Brazílii.



Obr. č. 2 Základní tvary krystalů přírodního diamantu

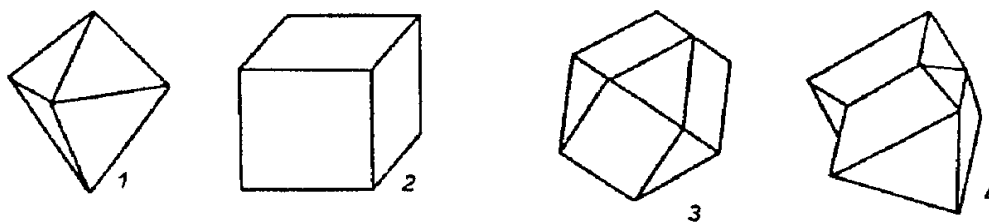
a) rovnoběžný osmistěn, b) kosočtvercový osmistěn, c) krychle, d) kombinovaný
s rovinnými stěnami

Syntetický diamant

První syntetické diamanty se podařilo vyrobit v roce 1953 v podniku ASEA ve Švédsku a v podniku GENERAL ELEKTRIC v USA. V bývalém SSSR vyrobili první syntetické diamanty v roce 1960, v bývalém Československu v národním podniku PRAMET Šumperk v roce 1966 (jako 6. tým na světě).

Výroba syntetických diamantů je založená na stejném principu jako přeměna uhlíku v přírodě, jen časy přeměny jsou urychlené. V současné době proces výroby diamantů trvá několik minut. Syntetický diamant se získává pomocí katalyzátoru a z materiálu obsahující uhlík. Jako výchozí materiál se používá grafit (nebo saze, dřevěné uhlí – jen zřídka), katalyzátor může být kov (chrom, nikl, železo, kobalt, mangan, případně jejich kombinace...). Katalyzátor se za vysokého tlaku a teploty taví a atomy uhlíku mění svou hexagonální strukturu na kubickou, která je pro diamant typická. Syntéza probíhá za tlaku $P = 10\,000 - 20\,000$ Mpa a teploty $1500 - 2500$ °C po dobu asi jedné minuty. Po syntéze vznikají malé krystalky diamantu (velikost do 1 mm). Pevnost a vlastnosti krystalů umělého diamantu závisí na složení základního materiálu a podmínkách syntézy.

Základní tvary krystalů syntetických diamantů jsou: krychle, osmistěn, jejich kombinace – kubooktaedr a různé srostlice (obr.č. 3). Tvary jako např. rombooktaedr, tetraedr a jiné, ve kterých se vyskytují přírodní diamanty, nejsou pro syntetické diamanty typické.



Obr. č. 3 Základní tvary krystalů syntetického diamantu

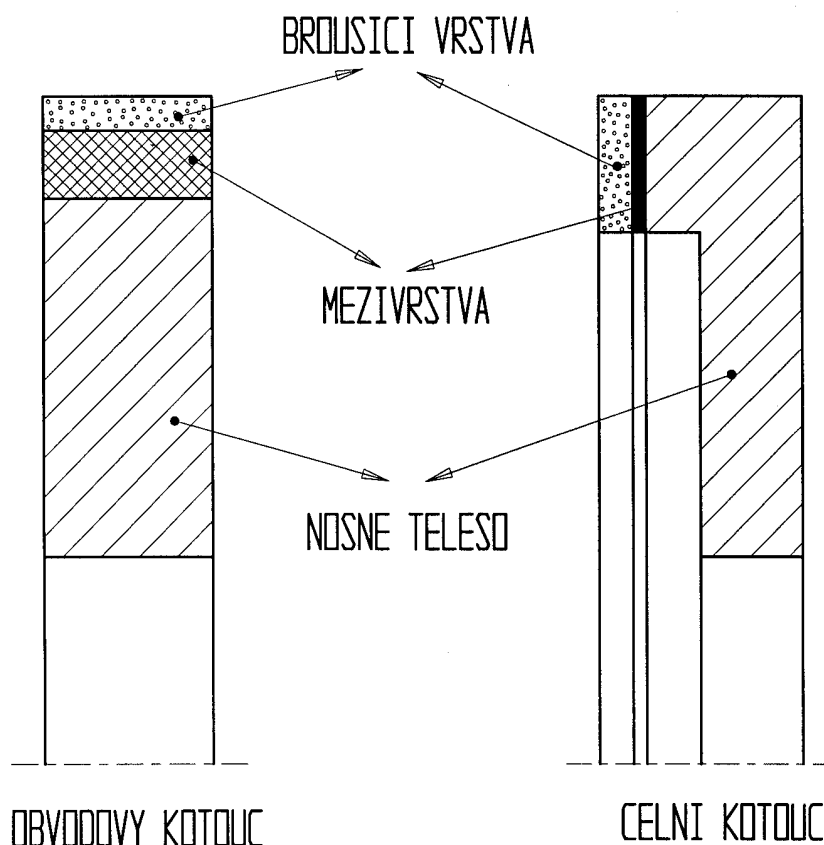
1)oktaedr 2)krychle 3)kubooktaedr 4)srostlice dvou oktaedrů

4.1.2 TVAR KOTOUČE

Diamantový broušící kotouč je nástroj tvaru rotačního tělesa, který se skládá z nosné části a části aktivní – broušící vrstvy. Broušící vrstva je ve tvaru prstence a je upevněna nalisována, přislinuta) na nosné těleso (obr. č. 4). Nosná tělesa se vyrábí z oceli, hliníku, bronzi, mosazi, plastu (podle druhu broušící vrstvy, typu kotouče, technologii broušení). Malé kotouče se někdy vyrábí celolisované, tzn. že broušící vrstva a nosné těleso jsou obojí lisovány najednou ve speciálním nástroji (polotovary nosného tělesa je prášek). Tento způsob je velmi výhodný, neboť odpadá soustružení nosného tělesa a spoj mezi broušící vrstvou a tělesem je také mnohem kvalitnější .

Tvar a umístění broušící vrstvy (na čele nebo na obvodu) se volí podle použití nástroje – kotouče.

Mezi broušící diamantovou vrstvou a nosným tělesem bývá zpravidla (hlavně u klasických obvodových a čelních kotoučů) tzv. mezivrstva (vrstva pomocného materiálu bez diamantu), která má za úkol ukotvit broušící vrstvu k nosnému tělesu, tlumit vibrace a ochránit obrobený povrch součásti před poškozením v případě úplného spotřebování diamantové broušící vrstvy (zabrání se tak „broušení „ součásti nosným tělesem).



Obr. č. 4 Klasické typy dia. kotoučů

4.1.3 ROZMĚR KOTOUČE

Rozměry kotouče jsou charakterizovány hlavně průměrem kotouče, šířkou a tloušťkou brousicí vrstvy, celkovou tloušťkou kotouče a rozměrem upínacího otvoru.

Pro průměr brousicího kotouče platí: čím je větší, tím jsou příznivější termické a kinematické podmínky broušení, protože brusné zrna je následkem delší ochlazovací dráhy méně namáhané, což příznivě působí na životnost kotouče. To platí dvojnásob v poslední době, kdy jsou požadovány neustále vyšší výkony → větší rychlosti (vysokorychlostní obrábění). Volba průměru závisí na typu brusky, její konstrukce musí zabezpečit dosažení doporučených pracovních rychlostí (velmi důležitá je tuhost konstrukce, jak vřetene tak i soustava vřeteno – upínací systém obrobku, neboť diamant ač je velmi tvrdý, ale zároveň křehký a nesnáší jakékoliv rázy a vibrace).

Pro šířku brousicí vrstvy platí: úzká brousicí vrstva umožňuje větší výkon broušení s malým vývinem tepla. Příliš široká brousicí vrstva způsobuje velký vývin tepla

v místě řezu, což může mít vliv na snížení výkonu broušení. Také platí čím větší šířka brousicí vrstvy, tím větší potřebný přítlak a s tím spojená tuhost stroje. Zásadně se musí využívat celá šířka brousicí vrstvy, pokud by tomu tak nebylo, docházelo by k deformaci tvaru brousicí vrstvy a kotouč by se musel orovnávat a tím by se velmi snížila jeho životnost. Řešením je (pokud je to z technického hlediska možné) použít užší kotouč než je šířka obrobku a s kotoučem přejíždět (oscilovat) přes okraje obrobku.

Tloušťka brousicí vrstvy: má hlavně ekonomický význam. Čím větší je, tím je to pro odběratele (spotřebitele) výhodnější (při dvojnásobné tloušťce brousicí vrstvy nebývá cena kotouče zdaleka dvojnásobná), ale pro výrobce už méně výhodné. Většinou se volí kompromis ekonomicky výhodný pro obě strany. Z velké části je to také ovlivněno množstvím typů lisovacích nástrojů, kterými výrobce disponuje a dalšími technologickými činiteli.

Celková tloušťka kotouče: má vliv hlavně na tuhost kotouče. Čím větší tloušťka, tím větší tuhost, ale zároveň vyšší hmotnost a s ní spojené zatížení vřetene a konstrukce stroje. Opět se volí kompromis s ohledem na konstrukci stroje, upínací příruby, velikost pracovního prostoru a také materiál nosného tělesa a brousicího kotouče.

Rozměr upínacího otvoru: je závislý na konstrukci stroje, upínacího systému. U obvodových kotoučů platí nepsané pravidlo: ϕ upínacího otvoru = $1/3 \phi$ kotouče.

4.1.4 DRUH POJIVA

Pojivo patří mezi nejdůležitější činitele, které charakterizují diamantový brousicí nástroj. Pojivo ovlivňuje rozhodujícím způsobem výkon broušení, životnost kotouče, tvarovou stálost, samoostřicí vlastnosti apod. Výběrem pojiva dosáhneme, že diamantový kotouč brousí s velkým výkonem při malém přítlaku, ale s kratší životností charakteristické pro měkké pojivo, anebo s velkou životností s nižším výkonem a větším přítlakem – charakteristické pro tvrdé pojivo. Při volbě pojiva se musí také přihlížet na použitý druh diamantu (druhy pojiv se musí vhodně kombinovat s různými typy diamantu pro ně vhodné, např. do měkkého pojiva je vhodný méně pevný, členitější diamant, aby se docílilo co nejlepšího samoostření, naopak kvalitní velmi pevný diamant by se z měkkého pojiva vyloupil, kotouč by se postupně zaleštil – jeho řezivost by rapidně klesla), obráběný materiál a podmínky obrábění (obvodová rychlost, tříska, posuv, způsob chlazení atd.).

Existuje celá škála typů diamantu vhodných do určitých typů pojiv a na určité operace. Existuje několik kritérií hodnocení: tepelná odolnost, pevnost, tvar zrna. Dále se používá různých povrchových úprav diamantu pro lepší ukotvení v pojivu, případně odvod tepla z místa řezu. Jedná se o pokovení niklem (hlavně pro pryskyřičná pojiva), mědí (pro bronzová pojiva), titanem.

Pojivo jako takové je tvořeno pojící fází a plnivy. Pojící fáze má za úkol spojit dohromady plniva s brusivem. Její podíl v pojivu je min. 50% objemových. U kovových pojiv je pojící fáze nejčastěji bronz legovaná kovy jako Co, Mn, Ni, Fe, u pryskyřičných pojiv jsou to různé typy termosetických pryskyřic (např. fenol – formaldehydové, polyamidové). Jako plnivo se používá velmi rozmanitá škála materiálů zaručujících pojivu specifické vlastnosti. Plniva ovlivňují vlastnosti pojiv jako např. otěruvzdornost (Al_2O_3 , SiC, WC...), dále se plniva používají pro snížení tření (grafit, dřevěné uhlí, Fe_2O_3 ), pro zjemnění struktury (Ag) a celou další řadu technických a technologických vlastností pojiv.

Jak už bylo naznačeno výše, používá se několik druhů pojiv:

- kovová
- pryskyřičná
- keramická

Kovová pojiva jsou tvrdší jak pryskyřičná. Jsou charakteristická vysokou trvanlivostí, tvarovou stálostí broušící vrstvy, mají však horší řezné vlastnosti a práce s nimi je doprovázena větším vývinem tepla. Používají se hlavně pro opracování skla, keramiky, ale i slinutého karbidu a ostatních materiálů. Obzvláště jsou vhodné pro profilové kotouče (např. broušení hran skel, pro broušení SK destiček na závity...), protože mnohem lépe než pryskyřičné kotouče drží tvar, hranu a rozměr. Broušící kotouče s kovovým pojivem se vyrábí buď slinováním na odporových lisech (forma je zahřívána vlivem el. odporu vzniklého průchodem proudu přes ni a grafitové nahřívací hlavy, lisovací tlak působí po celou dobu nájezdu na teplotu, během výdrže i chládnutí), nebo způsobem, který spočívá v zahřátí formy v elektrické peci a následném lisování pod hydraulickým lisem. Lisovací formy jsou vyráběny buď z šedé litiny (slinování na odporových lisech) nebo ze žárupevné slitiny např. NIMONIC (slinování v peci) nebo někdy z důvodu finanční úspory pro kusovou výrobu z oceli 12050 (cena slitiny NIMONIC se pohybuje kolem 4000-5000 Kč/kg). Dalšími metodami výroby dia. kotoučů v kovovém pojivu jsou např. infiltrace

(matrice pojiva s diamantem jsou slisovány za studena a následně v peci s ochrannou atmosférou infiltrovány pojící fází) nebo metoda volného slinování (pojivo s diamantem lisováno za studena a následně vylišováno z formy a volně slinováno opět v peci s ochrannou atmosférou).

Pryskyřičná pojiva se vyznačují vysokou produktivitou broušení, nízkým vývinem tepla, výbornými samoostřicími vlastnostmi, ale nižší životností než kotouče v kovovém pojivu. Jak už bylo uvedeno výše, broušení s nimi je velmi produktivní (ve srovnání s kovovým pojivem až 4x), proto jsou v současnosti kotouče s pryskyřičnými pojivy nejpoužívanější. Jistou roli v tom hraje také ekonomický aspekt, protože kotouče s pryskyřičnými pojivy jsou cenově příznivější z důvodu menší energetické náročnosti na výrobu a materiálové nákladnosti (prášková pryskyřice je levnější než prášková bronz). Brousící kotouče s pryskyřičnými pojivy se vyrábí tzv. vytvrzováním na hydraulických lisech s vytápěnými lisovacími deskami za teplot 180-250 °C (podle druhu pryskyřice). Lisovací formy jsou vyráběny z kalených nástrojových ocelí (např. 19436), výjimečně z konstrukčních ocelí tř. 11, podle sériovosti .

Diamantové (spíš KBN) brousící kotouče s keramickým pojivem jsou určené hlavně pro broušení obrobků z tvrdých slitin a kobaltových, vanadových a vanad – kobaltových rychlořezných ocelí (velmi houževnaté materiály, které se velmi špatně brousí, mají tzv. dlouhou třísku). Tyto kotouče mají při dostatečném chlazení velmi dobré řezné vlastnosti, nezanáší se a zabezpečují vysokou kvalitu obroušené plochy a lze je orovnávat diamantovými orovnávači, což je výhodné v hromadné a velkosériové výrobě (automobilový a ložiskářský průmysl).

4.1.5 ZRNITOST BRUSIVA

Zrnitost diamantu má největší vliv na jakost obroušené plochy. Čím větší zrnitost, tím drsnější povrch.

Diamantové prášky se podle použití, rozměrů zrn, metody jejich získání a kontroly granulometrického složení dělí na dvě skupiny:

- diamantové prášky prosívané u nichž se granulometrické složení kontroluje prosíváním
- diamantové prášky mikronové , u nichž se granulometrické složení kontroluje mikroskopickou metodou

Výpis z normy ČSN 22 4015

Rozměr zrn prosívaných prášků je určen jmenovitou délkou strany oka dvou kontrolních sít v mikrometrech, kde vrchním sítem musí zrna propadnout a na spodním se zadržet a je označen zlomkem, kde v čitateli je uvedena délka strany oka vrchního a ve jmenovateli délka strany oka spodního.

Rozměr zrn diamantových prášků mikronových je určen poloviční hodnotou součtu délky a šířky (v mikrometrech) obdélníka opsaného průmětu zrna takovým způsobem, aby delší strana obdélníka odpovídala největší délce průmětu zrna. Označuje se zlomkem, kde v čitateli je uveden největší rozměr zrna a ve jmenovateli nejmenší rozměr zrna.

Existují ještě další normy jako např. Holandská, Americká, Anglická, Německá, ale pro přehlednost byly zvoleny standardy:

- **FEPA standard** – zrnitost je značena přibližně jako střední hodnota rozměrů ze zlomku (tab. č. 3)
- **US standard** – používaný v anglo-saských zemích, zrnitost je značena zlomkem, stejně jako u ČSN, ale s tím rozdílem, že zde je použit rozměr Mesh (počet ok síta na délkový palec – to má za následek, že čím vyšší číslo, tím menší oko – zrnitost)

FEPA STANDARD	ČSN	US STANDARD
	mikron	mesh
D39	40/36	400/500
D46	50/40	325/400
D54	-	270/325
D64	63/50	230/270
D76	80/63	200/230
D91	-	170/200
D107	100/80	140/170
D126	125/100	120/140

Tab. č. 3 Porovnání značení zrnitostí standardů FEPA a US s normou ČSN

4.1.6 KONCENTRACE BRUSIVA

Koncentrace brusiva vyjadřuje hmotnostní obsah brusiva v 1 cm³ brousicí vrstvy. Jako základ byla stanovena koncentrace K100, kde 1 cm³ obsahuje 0,88 (4,4 crt) brusiva a zaujímá 25% objemu brousicí vrstvy.

Nízká koncentrace zaručuje dobré samoostřicí vlastnosti kotouče, zvyšuje výkon broušení, snižuje vývin tepla, snižuje životnost kotouče, zhoršuje stálost tvaru a zvyšuje drsnost povrchu .

Vysoká koncentrace zvyšuje pracovní tvrdost kotouče, snižuje výkon broušení, zvyšuje vývin tepla, zlepšuje stálost tvaru kotouče, zvyšuje životnost kotouče, snižuje drsnost povrchu kotouče.

4.2 NÁVRH DIA KOTOUČE

Pryskyřičné pojivo (**P**) je nejpoužívanějším pojivem, protože se vyznačuje vysokou produktivitou broušení, nízkým vývinem tepla, dobrými samoostřicími vlastnostmi. Pojiva jsou označena B-I až B-XVII a používají se s chlazením. Pryskyřičná pojiva lze použít i bez chlazení za určitých podmínek (úzká brousicí vrstva, nižší obvodová rychlost, přítlak, posuv, krátký strojní čas, nižší koncentrace apod.)

Efektivnost broušení ovlivňuje kromě výše uvedených parametrů celá řada dalších podmínek jako je např. velikost styčné plochy kotouče s obrobkem, způsob podávání (ruční, poloautomat, automat), kvalifikace obsluhy apod.

Pokroková metoda broušení při velkých přídavcích využívaná hlavně při broušení slinutých

karbidů a keramiky. Ve srovnání s klasickými metodami broušení je několikanásobně produktivnější, je však podmíněna vysokou tuhostí stroje, nástroje a obrobku.

Vzhledem k použití brousícího kotouče na keramiku volím:

- pryskyřičné pojivo s interním označením BVII,
- syntetický diamant D 126,
- koncentraci K100,
- průměr kotouče 400 mm,
- technologie broušení obrobku těsnícího kroužku požaduje tvar kotouče univerzální pro broušení čelní, obvodové (profilové) se zápichem. Tvar diamantového kotouče viz výkres č. 200.00.001 S3.

5 DISKUZE EXPERIMENTU

5.1 BROUSICÍ STROJE

Brousicí stroje a technologie v důsledku tlaku inovací v soustružení a frézování stále zlepšují své charakteristické vlastnosti, kterými jsou především stabilně vysoká přesnost práce a dobrá integrita obrobeného povrchu. Současně roste produkční výkon těchto strojů a jejich orientace na potřeby zákazníka. To se projevuje množstvím volitelných variant při stavbě hrotových i bezhrotých brusek a rostoucí nabídkou brousicích center. Zároveň se zvětšuje i nabídka strojů pro kombinované technologie. Do konstrukce brousicích strojů také pronikají novinky vyzkoušené a osvědčené ve stavbě frézovacích strojů. Jde např. o přímé pohony, které jsou používány z důvodu zvýšení rychlosti a dynamiky stroje a vysoké přesnosti při dráhovém řízení nebo o netradiční materiály používané ve stavbě nosné struktury strojů. Šedé litině velmi dobře konkuruje polymerbeton a žula, objevují se však i svařovaná lože. Brousicí stroje a technologie v důsledku tlaku inovací v soustružení a frézování stále zlepšují své charakteristické vlastnosti, kterými jsou především stabilně vysoká přesnost práce a dobrá integrita obrobeného povrchu. Současně roste produkční výkon těchto strojů a jejich orientace na potřeby zákazníka. To se projevuje množstvím volitelných variant při stavbě hrotových i bezhrotých brusek a rostoucí nabídkou brousicích center. Zároveň se zvětšuje i nabídka strojů pro kombinované technologie. Do konstrukce brousicích strojů také pronikají novinky vyzkoušené a osvědčené ve stavbě frézovacích strojů. Jde např. o přímé pohony, které jsou používány z důvodu zvýšení rychlosti a dynamiky stroje a vysoké přesnosti při dráhovém řízení nebo o netradiční materiály používané ve stavbě nosné struktury strojů. Šedé litině velmi dobře konkuruje polymerbeton a žula, objevují se však i svařovaná lože.

Třískové technologie pracující s nástroji s definovaným tvarem břitu zaznamenaly v minulé dekádě výrazný rozvoj. Některé z nich, např. tvrdé soustružení a frézování, se začaly svými dobrými výsledky v oblasti dosažitelné drsnosti povrchu a schopnosti opracovat kalený povrch přibližovat technologii broušení, a na to musela tato tradiční technologie odpovídajícím způsobem reagovat.

5.2 INTEGRITA POVRCHU–KLÍČOVÝ FAKTOR SOUČASNOSTI

V euforii devadesátých let minulého století, plynoucí z vynikajících vlastností nových řezných materiálů, které umožnily masové rozšíření těchto nových technologií, se zdálo, že podíl klasického broušení na celkovém objemu třískových operací se bude snižovat ve prospěch těchto technologických novinek. Výrobci brousicích strojů zareagovali na tento stav zdůrazněním tradičních předností brousicí technologie a rozšířením možností brousicích strojů a nástrojů. Mezi hlavní výhody broušení patří stabilní přesná výroba dílů s malými tolerancemi a dobrá integrita obrobeného povrchu. V euforii devadesátých let minulého století, plynoucí z vynikajících vlastností nových řezných materiálů, které umožnily masové rozšíření těchto nových technologií, se zdálo, že podíl klasického broušení na celkovém objemu třískových operací se bude snižovat ve prospěch těchto technologických novinek.

Pojmem integrita povrchu se rozumí souhrn faktorů popisujících vlastnosti obrobené plochy – např. drsnost, mikrotvrdost nebo průběh napětí v povrchové vrstvě. S rozvojem technicky náročných oborů, jako je letecký a kosmický průmysl nebo energetické stroje, je sledování integrity povrchu věnována značná pozornost. To znamená, že důležitá není pouze dosažená drsnost povrchu, ale také pnutí v materiálu vzniklé v důsledku výrobní technologie. Toto vnitřní napětí se při zatížení součásti v provozu sčítá s provozním napětím. Výsledkem může být překročení limitních hodnot napjatosti a vznik mikrotrhlin na povrchu dílu, které mohou způsobit poškození součástky a havárii celého zařízení.

5.3 ZAŘÍZENÍ PRO BROUŠENÍ KERAMIKY

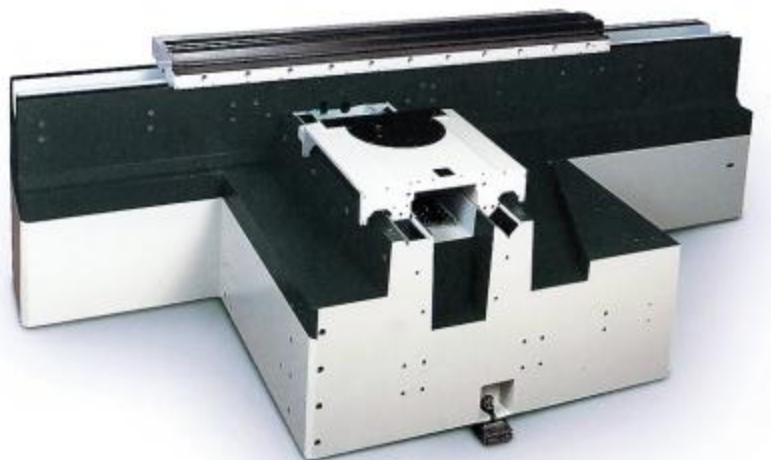
Především hrotové brusky jsou výrobci nabízeny se širokým spektrem provedení brousicích vřeteníků tak, aby počet, uspořádání a parametry každého vřeteníku vyhověly konkrétním požadavkům zákazníka. I z tohoto důvodu jsou stroje vybavovány řídicími systémy s přehledným rozhraním pro programování stroje.

STUDER S31 - Univerzální broušicí zařízení

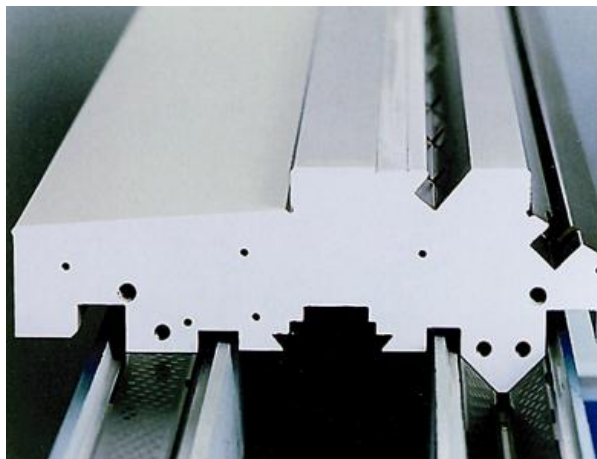
Studer S31 CNC je univerzální hrotové zařízení určené pro broušení středně velkých obrobků jednotlivě, stejně jako pro malo-sériovou tak i pro velko-sériovou výrobu. Je vhodný především pro broušení vysoce přesných obrobků.



Obr. č. 5 Univerzální hrotová bruska Studer S31



Obr. č. 6 Lože brusky Studer S31 z Granitanu a detailní pohled na vedení lineárních os



Obr. č. 7 Lože brusky Studer S31 z Granitanu a detailní pohled na vedení lineárních os



Obr. č. 8 Sortiment dílů pro vnější a vnitřní a broušení povrchu

Příkladem univerzálních brousicích hrotových brusek je řada S firmy Studer. Bruska S31 (obr. č. 5) má vzdálenost mezi hroty $650 \div 1\,000$ mm a výšku hrotů 175 mm. Větší zařízení S40 má rozteč mezi hroty $1\,000 \div 1\,600$ mm a výšku hrotů 175 nebo 225 mm. Společným konstrukčním rysem všech brusek Studer je lože z polymerbetonu Granitan S103, kluzná vedení lineárních os obložená materiálem s označením Granitan S200 se speciální povrchovou strukturou. Tato kombinace dle firmy Studer zajišťuje dobrou termickou stabilitu konstrukce, zlepšené tlumení vibrací ve srovnání s běžnou litinou, vysokou přesnost, dobrou únosnost a minimální Stick-Slip efekt. Vedení je navíc prakticky bezúdržbové. Také tyto stroje jsou nabízeny s možností různé konfigurace brousicího vřeteníku. Otáčení vřeteníku okolo osy je možné polohovat. Pohon osy je šnekovým převodem, zpevnění v poloze pomocí Hirtova ozubení. Brousicí vřetena stroje S31 mají pohon integrovaným elektromotorem.

Tab. č. 4 Technické parametry brousicího zařízení Studer S31

Hlavní rozměry	Metrické
Vzdálenost mezi hroty:	650 mm / 1000 mm
Hlavní výška:	175 mm
Maximální váha obrobku:	80 / 120 kg
(X)	
Max. pojezd:	254 / 280 mm
Rychlost:	0.001 - 5000 mm/min
Rozlišení:	0.0001 mm
(Z)	
Max. pojezd:	800 / 1150 mm
Rychlost:	0.001 - 10,000 mm/min
Rozlišení:	0.0001 mm
Otočné vřeteno	
Rozsah otočení:	-15 -
Otočná osa:	2.5 / 1
Jemné nastavení:	0.0001
Hnací výkon:	7.5 kW
Brusný kotouč vlevo:	400 x 63 x 203.2 mm
Brusný kotouč vpravo:	400 x 63 x 203.2 mm
Vnitřní broušení:	HF
Pracovní vřeteno	
Rozsah otáček:	1 – 1500 ot/min
Montážní kužel:	MK 4
Hnací výkon:	3.0 / 4.0 kW
Zatížení při broušení:	70 / 100 / 180 / 250 Nm
Tolerance přesnosti:	0.0004 / 0.0002 mm
C osa pro formu broušení:	0.0001
Koník	
Montážní kužel:	MT 3 /
Zdvih hlavy:	35 mm
Průměr hlavy:	50 mm
Jemné nastavení:	± 40 µm
Otočný stůl stroje:	n/a
Ovládání:	Fanuc 21i-TB
Přímost povrchové linie:	0.0025 mm / 650 mm
Celkový příkon:	32 kVA

5.4 HODNOTY NASTAVENÍ CNC

Studer S 31 CNC

Brusný kotouč – vnější broušení na kulato

Označení: 1A1 (pravouhý/čtvercový/průřez)

Označení: Kotouče na poloměr ($r=0,5 - 3,5$)

Rozměry: 300x50x15 mm (DaxDIxB)

Rozměry: 500x203,2x20 mm (DaxDIxB)

Rozměry: 400x127x20 mm (DaxDIxB)

Tloušťka povrchové vrstvy: 3 – 5 mm

Kotouč vyvážit posuvnými segmenty na vyvažovací kolíbe

Orovnat orovnávačem A 98 80K nebo C 49 80K

Jakost: D 126 K100

Nastavovací hodnoty

Počet otáček pouzdra

Prům. těs. kroužku /mm/	n (1/min)
Do 100	250
100-200	150
200-300	70

Zdvihy vyjiškření – dle jakosti povrchu – 4 - 6

Oscilační posuv

Pro vnější broušení: 200-4000 mm/min

Pro vnitřní broušení: 200 – 2000 mm/min

Posuv: 0,1mm/min – 0,6mm/min (stupeň 1-6)

Řezná rychlost: cca 25-50m/s

Brusný olej: H 362

5.5 Experiment

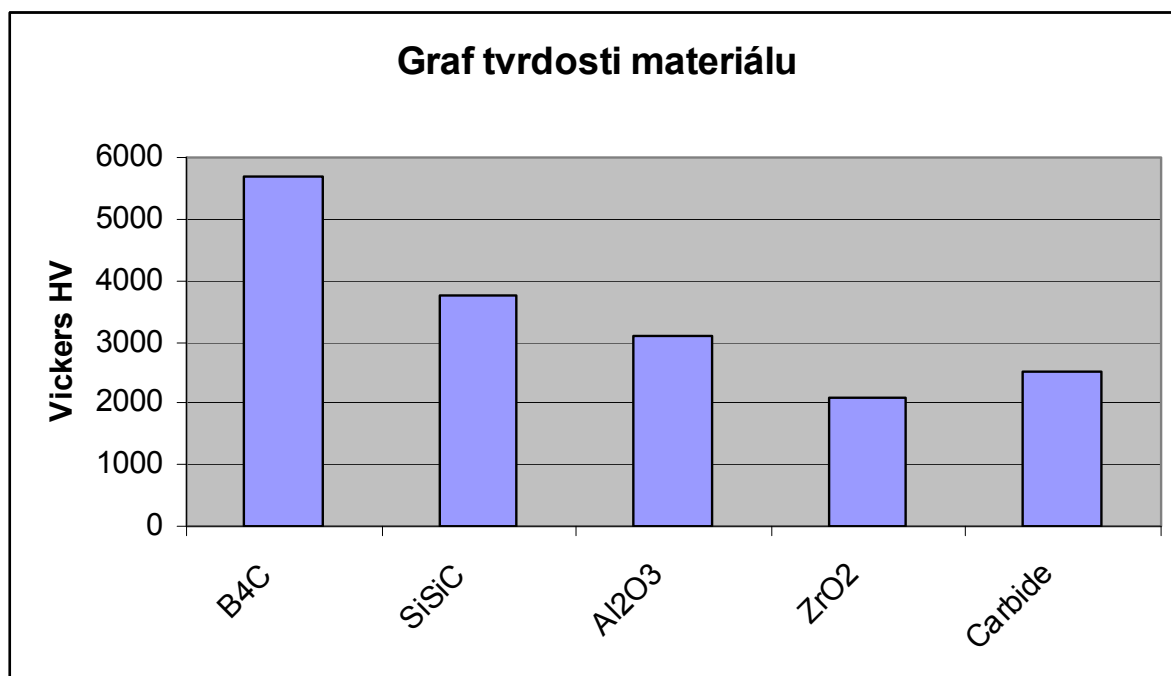
Sledovat budeme broušení diamantovým kotoučem (průměru 400 mm, pryskyřičná vazba, diamant D 126, koncentrace K100), obrobek těsnícího kroužku z materiálu SiSiC. Obrobek viz výkres.č. 200.00.002

Řezná rychlost:

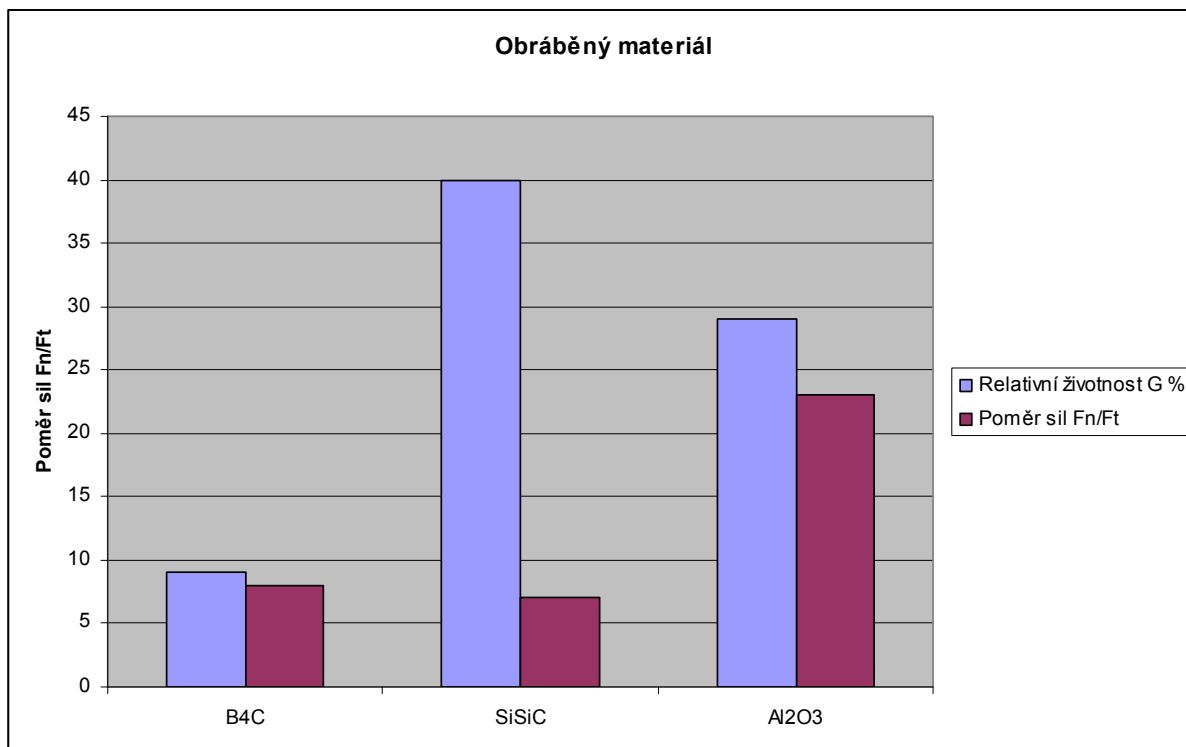
- a) 25 m/s
- b) 35 m/s
- c) 45 m/s
- d) 55 m/s

Posuv konstantní 0,3 mm/min.

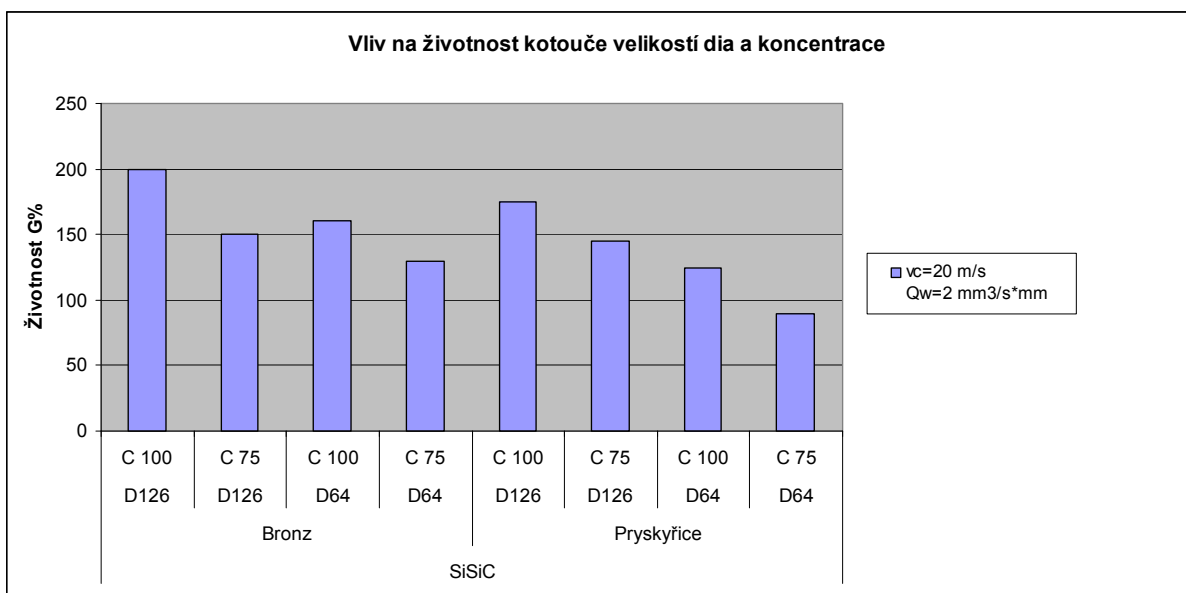
Broušení čelní, obvodové (se zápichem) kotouč v profilu brusné vrstvy 30°, otočná brousící hlava až 15°.



Graf č. 1 Srovnání tvrdosti různých keramických materiálů a kovů

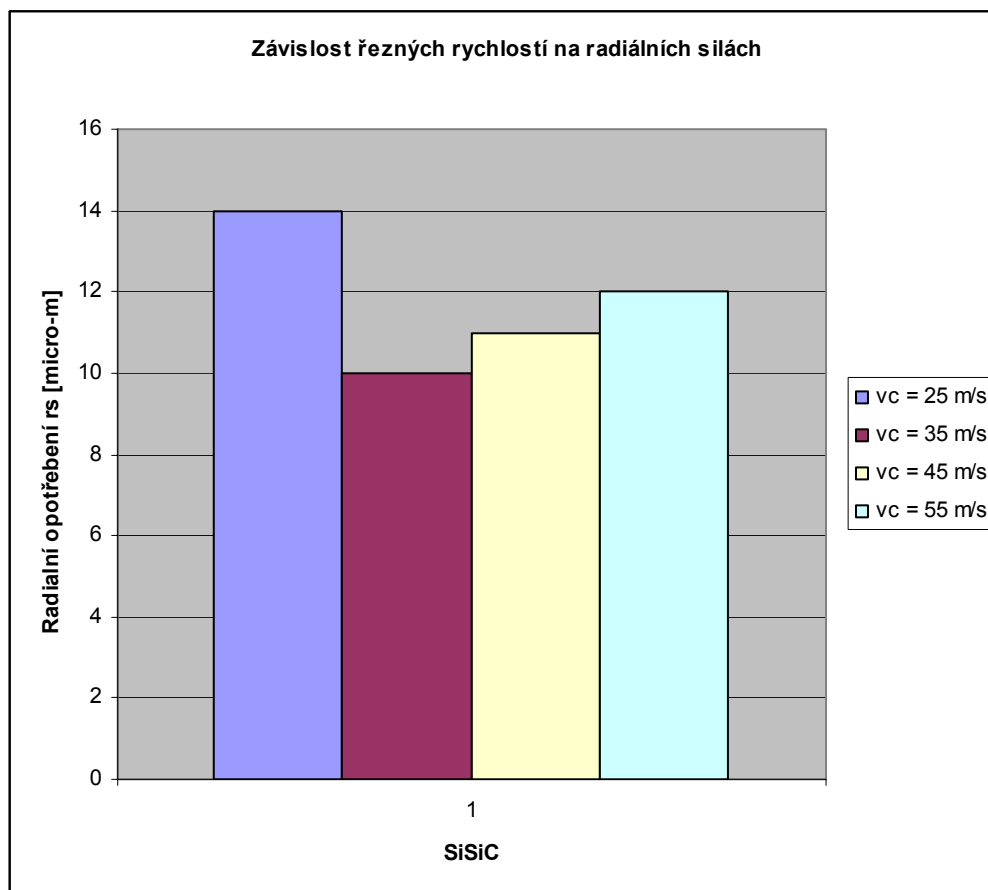


Graf č. 2 Průměr kotouče = 400 mm, D 126, K 100, $v_c = 20$ m/s, $Q_w = 2$ mm³/s*mm
Relativní životnost nástroje a poměr sil při broušení různých typů keramiky



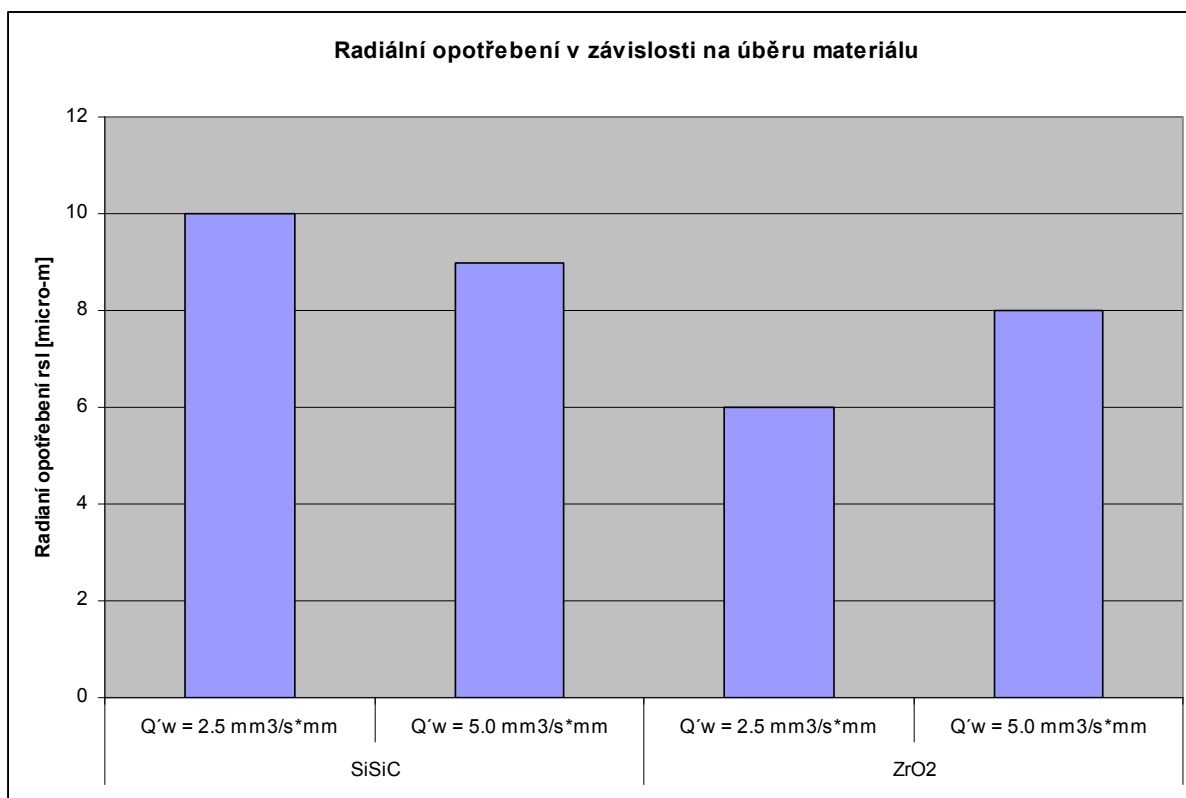
Graf č. 3 Vliv na životnost kotouče velikostí diamantu a koncentrace

Při použití pryskyřicových pojiv lze předpokládat, že z důvodu jejich elastického broušení, budou mít malý vliv na povrchové nerovnosti. Provozní podmínky zvýšení řezné rychlosti obecně má za následek snížení radiální síly.



Graf č. 4 Kotouč: D 126, K 100, $Q_w = 2 \text{ mm}^3/\text{s} \cdot \text{mm}$

Standartní řezná rychlost byla navrhnutá na 35 m/s. Zvýšení řezné rychlosti až na 55 m/s v hlubokém broušení má různé účinky. Jakmile je optimální rychlost překročena, radiální opotřebení brusného kotouče se opět zvyšuje. Při broušení rychlostí nad 35 m/s, se radiální opotřebení zvyšuje. Při snížení řezné rychlosti pod 30 m/s opotřebení razantně narůstá. Optimální rychlosti v tomto případě jsou přibližně na 35 až 45 m/s. Při broušení jsou řezné síly proměnné, které mohou mít vzájemný vliv.



Graf č. 5 Kotouč: D 126, K 100, $v_c = 35$ m/s

Nicméně vyšší úběr materiálu nemusí nutně vést ke snížení životnosti nástroje. Dle grafu č. 5 můžeme říci, že radiální opotřebení u materiálu SiSiC, při konstantní řezné rychlosti je vyšší při menším úběru materiálu:
 $Q'w = 2.5 \text{ mm}^3/\text{s} \cdot \text{mm}$ než při hlubším úběru $Q'w = 5.0 \text{ mm}^3/\text{s} \cdot \text{mm}$

Drsnost obrobeného povrchu v závislosti na řezné rychlosti:

Určení otáček motoru:

- a) řezná rychlost 25 m/s
- b) řezná rychlost 35 m/s
- c) řezná rychlost 45 m/s
- d) řezná rychlost 55 m/s

$$\text{a) } v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \Rightarrow n = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot d} = \frac{25 \cdot 60}{\pi \cdot 0.4} = 1194 \text{ ot/min}$$

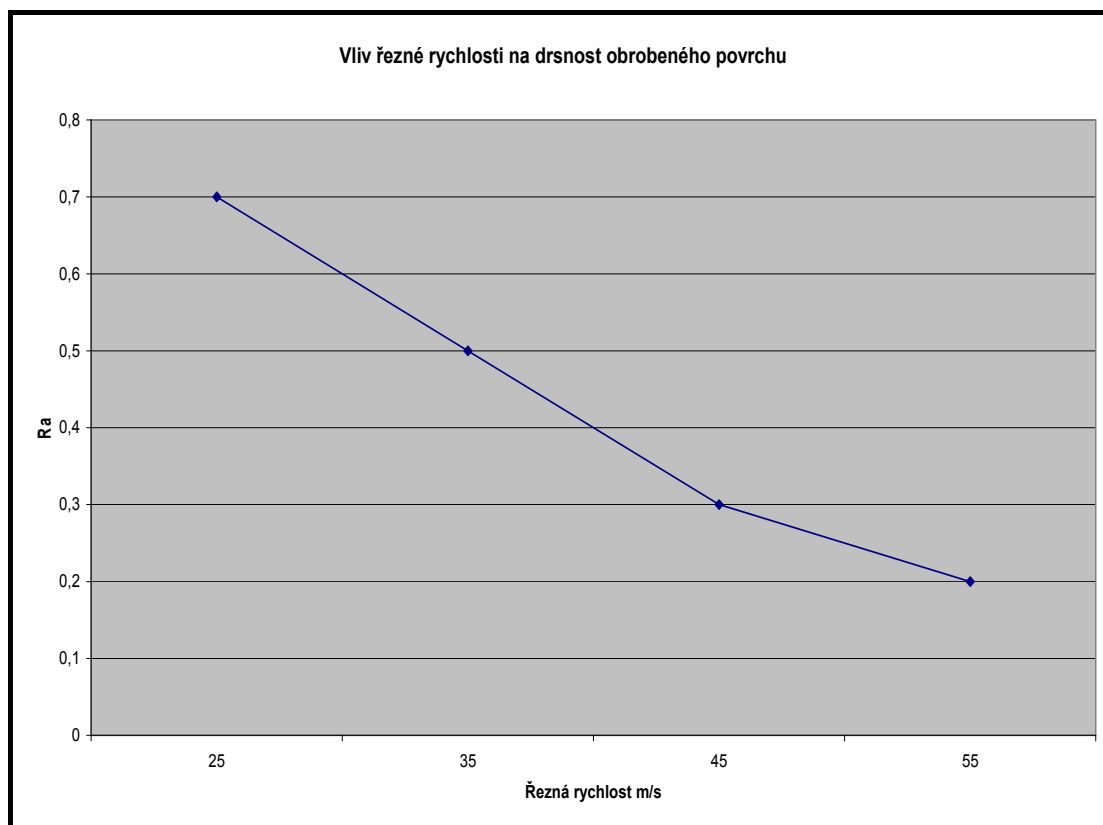
$$\text{b) } v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \Rightarrow n = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot d} = \frac{35 \cdot 60}{\pi \cdot 0.4} = 1671 \text{ ot/min}$$

$$c) \quad v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \Rightarrow n = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot d} = \frac{45 \cdot 60}{\pi \cdot 0.4} = 2149 \text{ ot/min}$$

$$d) \quad v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \Rightarrow n = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot d} = \frac{55 \cdot 60}{\pi \cdot 0.4} = 2627 \text{ ot/min}$$

Tab. č. 5 Naměřené hodnoty při konstantním posuvu 0.3 mm/min

ŘEZNÁ RYCHLOST m/s	DRSNOST POVRCHU Ra
25	0,7
35	0,5
45	0,3
55	0,2



Graf č. 6 Vliv řezné rychlosti na drsnost obrobeného povrchu

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Z naměřených experimentů můžeme vyvodit několik vyhodnocení. Z hlediska technického navrhnutý diamantový kotouč splnil úkol multifunkčního univerzálního kotouče v souvislosti s úhlovým natáčením kotouče pro čelní, obvodové tak i pro zápichové broušení. Dále pryskyřičné pojivo BVII se také ukázalo jako vhodné pro broušení materiálu SiSiC. Zrnitost diamantu bychom mohli kvůli drsnosti obrobené plochy snížit, ale i přesto drsnost plochy dosahovala požadované tolerance. Koncentrace se jeví také jako přiměřená k tomuto obrábění. Keramické materiály mají při broušení tendenci brusné kotouče zalešťovat, toto se v našem případě nestalo, nástroj se sám ostřil, což je také pozitivní závěr experimentu. Ekonomicky tato metoda obrábění jistě najde své místo, jak už pro svoji dovednost používání jednoho univerzálního nástroje, což šetří strojní časy, tak i pro kvalitní obrobenou plochu.

7 ZÁVĚR

Broušení je významnou technologií obrábění. Vzhledem k tomu, že se jedná o složitý proces, kdy nelze jednoznačně definovat ostří nástroje (zrna), je nutno vytvářet a získávat maximum informací o procesu a jeho výsledcích nejlépe z experimentů. Vývoj v oblasti broušení stejně jako v ostatních třískových technologiích se nezastavil, jsou zde další možnosti tvorby nových materiálů, brousicích kotoučů a systémů, lepší možnosti poznání procesu a jeho řízení.

Podstata procesu se odvíjí od klasické teorie obrábění s některými odlišnostmi platnými pro jedno a více břitů nástroje. Jedná se o velikost třísky, rychlost deformace, tepelné poměry včetně tepelné bilance procesu, počet pracovních břitů a také způsob opotřebení břítu.

Výzkum broušení je prováděn ve všech průmyslově vyspělých zemích. Důvodem jsou nové poznatky směřující k závěrům, že broušení může přinést zvýšení produktivity práce a snížení výrobních nákladů. Současně lze z výzkumů usoudit, že bude možné dospět k takovým závěrům, jako je nový přístup k dimenzování součástí a určování přesnosti obráběných povrchů.

8 SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ

- [1] VASILKO, K; NOVÁK-MARCINČIN, J., HAVRILA, Výrobné inžinierstvo. Prešov: Datapress Prešov, 2003, 424 s. ISBN 80-7099-955-0
- [2] JURKO, Jozef; ZAJAC, Jozef; ČEP, Robert. Top trendy v obrábání, II. Časť – Nástrojové materiály, Žilina: MEDIA/ST, s.r.o., 2006, 193 s. ISBN 80-968954-2-7.
- [3] VASILKO, Karol; HAVRILA, Michal; NOVÁK-MARCINČIN, Jozef; MÁDL, Jan; ZAJAC, Jozef. Top trendy v obrábání, III. časť – Technológia obrábání, Žilina: MEDIA/ST, s.r.o., 2006, 214 s. ISBN 80-968954-2-7.
- [4] HOLEŠOVSKÝ, František; Broušení a jeho vliv na vlastnosti povrchu, Ostrava: Ediční středisko VŠB – TU Ostrava, 2007, 43 s. ISBN 978-80-248-1644-9
- [5] Urdiamant, s r.o. , Šumperk; www.urdiamant.cz
- [6] CeramTec, s r.o., Šumperk; www.ceramtec.com

9 PŘÍLOHY

Příloha č. 1 – výrobní výkres diamantového kotouče, č.v. 200.00.001 S3

Příloha č. 2 – výrobní výkres obrobku těsnícího kroužku, č. v. 200.00.002 S3

Příloha č. 3 – ukázka obrázků částí broušícího zařízení STUDER S31

Poděkování

Na závěr chci poděkovat konzultantovi bakalářské práce panu Ing. Kamilu Kupkovi za poskytnuté rady, informace a připomínky, které mi v průběhu zpracování bakalářské práce poskytl. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Urdiamant, s r.o. Šumperk, a CeramTec s r.o. Šumperk, za možnost zpracování bakalářské práce, a také vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Vladimíru Vrbovi, CSc. za poskytnuté rady při zpracovávání bakalářské práce.